طراحی اجکتور با کاربرد در صنعت بافت فرش*

(یادداشت پژوهشی)

مسعود حاجیان[۱] اسماعیل لکزیان[۲] علی فرهمند[۳]

چکیده *در این مقاله اجکتوری جدید، برای استفاده در صنعت نساجی و بافت فرش به‌روش عددی طراحی و بهینه‌سازی شده است. یکی از روش‌های معمول بافت فرش، فرایند کاشت نخ (Tufting) است که در این روش نخ توسط سیال هوا و بااستفاده‌از سوزن‌هایی به‌سمت فرش منتقل می‌شوند. در این تحقیق برای اولین‌بار استفاده از پمپ‌های اجکتور هوا برای انتقال نخ به داخل سوزن‌ها پیشنهاد شده و شرایط هندسی پمپ اجکتوری بدون درنظر گرفتن الیاف نخ بهینه شده است. معادلات ناویر استوکس به‌صورت دوبعدی، پایا، تراکم‌پذیر و با به‌کارگیری مدل توربولانسی Realizable k-ε حل شده‌اند. به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج با داده‌های تجربی چاپ‌شده برای پمپ اجکتوری مشابه، مقایسه شده که انطباق مناسبی حاصل شده است. پس از احراز اعتبار، پارامترهای هندسی ازجمله طول (با قطر ثابت) و زاویهٔ هم‌گرایی در محفظهٔ اختلاط و فشار ورودی اولیه در پمپ اجکتوری مورد بررسی قرار گرفتند. براساس نتایج عددی، مقادیر بهینه برای زاویهٔ هم‌گرایی محفظهٔ اختلاط و طول محفظهٔ اختلاط تعیین گردیده است؛ که در شرایط بهینه‌شدهٔ هندسی عملکرد پمپ اجکتوری هوا بهبود یافت. توسعهٔ پمپ‌های اجکتوری و بهینه‌سازی آن می‌تواند در پیشرفت صنعت فرش و نیز افزایش راندمان تولید و کاهش هدررفت انرژی، مفید باشد.*

واژه‌های کلیدی بافت فرش، پمپ اجکتوری، زاویهٔ هم‌گرایی، طول محفظهٔ اختلاط، نسبت دبی.

Design of Ejector for Carpet Knitting Industry

M. Hajian E. Lakzian A. Farahmand

Abstract *In this paper a new ejector pump for using in textile and carpet knitting industries has been designed and optimized by numerical method. One of the customary methods in carpet knitting is tufting through which strings are deployed by fluid (air) and particular needles. In this study, a new method for sucking and transferring strings into the needles by employing air ejector has been proposed and the geometric conditions of ejector pump are optimized without regarding the yarn. Navier-Stokes equations for two-dimensional domain for a compressible turbulent steady flow have been solved. Furthermore, the Realizable k-ε method has been employed for the turbulent flow. The numerical method is verified by available experimental data for similar ejector pump and good agreements are achieved. In this study, geometric parameters of length (with constant diameter), divergence angle in mixing chamber and initial inlet pressure are investigated. Numerical results suggest optimum values for divergence angle and length of the mixing chamber which promote the performance of air ejector pump. Developing and optimizing ejector pump can lead to carpet industry prosperity and increase in its efficiency of production and lowering the energy loss.*

Key Words Carpet knitting knitting , Ejector pump, Inclination angle, Length of mixing chamber, Entrainment ratio

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹٤/۸/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۲/۲۷ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v29i1.51213

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار.

(۲) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران e_lakzian@sbu.ac.ir

(۳) مدیر عامل شرکت هوران سازه سینا ریس.

مقدمه

فناوری پمپ‌های اجکتوری که به‌عنوان جت پمپ‌ها نیز شناخته می‌شوند، از لحاظ تاریخی به سال ۱۸۵۲ در انگلستان بر می‌گردد [1]. بااستفاده‌از ایجاد خلأ در این سیستم می‌توان سیالات مایع، گاز و حتی جامدات را منتقل نمود. آنها ساده‌ترین وسیله در میان انواع کمپرسورها و پمپ‌های خلأ می‌باشند [2]. در یک اجکتور جریان ثانویه با سرعت مادون‌صوت بر اساس کاهش فشار به‌وجودآمده از جریان اولیهٔ مافوق‌صوت، گذرنده از یک نازل هم‌گرا و واگرا، به داخل محفظهٔ اختلاط مکش می‌شود و درنهایت دو سیال ترکیب‌شدهٔ اولیه و ثانویه از انتهای انتهای اجکتور (دیفیوزر) خارج می‌شوند. پمپ‌های اجکتور خلأ درمقایسه‌با دیگر تجهیزات انتقال سیالات در صنعت دارای بازده کمتری می‌باشند، ولی به‌دلیل طراحی ساده و نداشتن عضو متحرک، عدم نیاز به روغن کاری، قیمت پایین و عدم سایش، این وسیله با استقبال خوبی در صنعت مواجه شده است. صنعت هوا و فضا، سیستم‌های تبرید، انتقال سیالات، ازجمله کاربردهای پمپ‌های اجکتوری در صنعت می‌باشد [7-3]. یکی از کاربردهای پمپ‌های اجکتوری می‌تواند در صنعت فرش و در فرایند کاشت نخ باشد. کاشت نخ به یک فرایند مهم در صنعت نساجی به‌خصوص بافندگی فرش و در دستگاه‌های بافندگی چند سوزنه (Multi-needle) اطلاق می‌شود. در این سیستم صدها رج الیاف که به دستگاه وارد می‌شود، توسط چند صد سوزن، به پارچهٔ پشتیبان که به آن پشتیبان اولیه (Primary backing fabric) نیز می‌گویند، بافته می‌شود. در مطالعهٔ حاضر از پمپ اجکتوری برای مکش و منتقل نمودن الیاف نخ استفاده شده است. الیاف نخ توسط پمپ اجکتور هوا به‌سمت سوزن‌ها منتقل می‌شوند و توسط سوزن‌ها در پارچهٔ پشتیبان اولیه بافته می‌شوند و درادامه به‌وسیلهٔ تیغه‌های برش بریده می‌شوند [8].

به‌جهت ویژگی انتقال جامدات توسط پمپ‌های اجکتوری در این تحقیق سعی شده است تا برای اولین‌بار استفاده از پمپ‌های اجکتوری برای مکش نخ به داخل سوزن‌ها به‌طور عددی مورد شبیه‌سازی و آنالیز قرار گیرد. لازم به ذکر است که در اجکتورها جریان هوا مافوق‌صوت می‌شود و دارای یک سری شوک‌های مایل و حتی گاه عمودی نیز می‌باشند که با حضور دو ورودی و تداخل جریان‌های اولیه و ثانویه، مدل‌سازی جریان بسیار پیچیده می‌شود. بدین جهت در این مطالعه از حضور الیاف نخ در شبیه‌سازی عددی صرف‌نظر شده است و هدف از این تحقیق بهینه‌سازی هندسی و آیرودینامیکی اجکتور برای رسیدن به بالاترین نسبت دبی و راندمان در اجکتور می‌باشد تا پمپ اجکتوری بیشترین مکش را در قسمت کشندهٔ الیاف نخ داشته باشد. در راستای بهینه‌سازی، پارامترهای هندسی و فشار ورودی اولیهٔ پمپ اجکتوری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این پارامترها تأثیر زیادی در مقدار و موقعیت شوک‌ها در اجکتور دارند [9]. با افزایش تعداد و شدت شوک‌ها در محفظهٔ اختلاط عملکرد و نسبت دبی (Entrainment ratio) در پمپ اجکتوری کاهش می‌یابد. به‌دلیل کاربرد فراوان نازل‌های هم‌گرا–واگرا و اجکتورهای مافوق‌صوت در صنعت و در جریان‌های تک‌فازی و دوفازی [21-10]، تحقیقات بسیاری برای بهینه‌سازی این تجهیزات ارائه شده است. از جمله این مطالعات بررسی تأثیر پارامترهای هندسی، پارامتر NXP (Nozzle exit position)، زاویهٔ هم‌گرایی (Inclination angle) و طول محفظهٔ اختلاط برروی عملکرد پمپ اجکتوری می‌باشد؛ ژیان جو و همکاران [9] مقدار بهینه‌ای را برای پارامترهای هندسی پمپ اجکتوری که در سیکل تبرید مورد استفاده قرار گرفت، گزارش دادند که از آن جمله می‌توان به موقعیت خروجی نازل جریان اولیه (NXP)، زاویهٔ هم‌گرایی محفظهٔ اختلاط (θ) و قطر محفظهٔ اختلاط (d_a) اشاره کرد. ایشان در حدود ۹۵

هندسهٔ مختلف را برای پمپ اجکتوری مورد بررسی قرار دادند و در نهایت نشان دادند که موقعیت NXP به قطر محفظهٔ اختلاط وابسته نمی‌باشد و با افزایش فشار جریان اولیه؛ موقعیت آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین بیان نمودند که با تغییرات زاویهٔ هم‌گرایی (θ) در پمپ‌های اجکتوری نسبت دبی می‌تواند تا حدود ۲۶٪ افزایش یابد. چن و همکاران [1] برروی پمپ اجکتوری در سیستم‌های تقویتی (Boosting system) برای بازیافت گاز طبیعی مطالعه نمودند. استفاده از پمپ‌های اجکتوری در سیستم‌های تقویتی و بازیافت یک روش پرهزینه به‌شمار می‌آید و در همین راستا بهینه‌سازی پمپ‌های اجکتوری می‌تواند در کاهش هزینه‌ها بسیار مؤثر باشد. ایشان برروی پارامترهای هندسی از جمله زاویهٔ هم‌گرایی محفظهٔ اختلاط (θ) و طول و قطر محفظهٔ اختلاط در قسمت سطح مقطع ثابت و با روش عددی مطالعه نمودند و مقادیر بهینه را گزارش دادند. همچنین در تحقیق ژو و همکاران[22] مشخص شد که طول و قطر محفظهٔ اختلاط تأثیر به‌سزایی بر عملکرد پمپ اجکتوری دارد. جی و همکاران [23] برروی ترموکمپرسورهای بخار(Thermo vapor compressor) مطالعه نمودند و بااستفاده‌از روش عددی به تغییر زاویهٔ هم‌گرایی محفظهٔ اختلاط از 0^0 تا 4.5^0 و در فشارهای ثانویهٔ مختلف پرداختند و مقدار بهینهٔ $\theta = 1^0$ را گزارش دادند. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از روش عددی با نتایج تجربی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. همچنین نشان دادند که افزایش فشار جریان اولیه موجب به‌وجود آمدن امواج شوک ضعیف می‌شود که نسبت دبی را کاهش می‌دهد. همچنین سریوراکول و همکاران [24] در مقالهٔ خود به بررسی تأثیرات تغییر ابعاد نازل جریان اولیه پرداخته است. او همچنین نشان داد، با افزایش قطر گلوگاه نازل جریان اولیه هسته‌های جت جریان در خروجی نازل بزرگ‌تر می‌شود و درنتیجه جریان ثانویهٔ کمتری اجازه ورود به محفظهٔ اختلاط را پیدا می‌کنند و نسبت دبی و در کل راندمان پمپ اجکتوری پایین می‌آید. همچنین افزایش قطر گلوگاه نازل جریان اولیه موجب افزایش مومنتوم ترکیب دو جریان می‌شود که این نیز باعث غالب شدن شوک‌های مایل ثانویه بر جریان می‌گردد.

علاوه بر پارامترهای هندسی، تأثیر فشار در ورودی اولیه و ثانویه بر عملکرد پمپ‌های اجکتوری نیز در مطالعات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. چن و همکاران [1] برروی تأثیر فشار ورودی اولیه بر عملکرد پمپ اجکتوری مطالعه کردند و مشخص شد که با افزایش فشار اولیه تا ۱۲MPa نسبت دبی افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر فشار اولیه دوباره نسبت کاهش می‌یابد. به همین صورت لیو و همکاران [25] نیز تأثیر فشار ورودی جریان اولیه و ثانویه را بر عملکرد پمپ اجکتوری بخار در یک سیکل بازیافت هیبریدی در یک سیستم تبرید مورد مطالعه قرار دادند. سریوراکول و همکاران [24] در مقالهٔ خود تأثیر فشار جریان ورودی اولیه و ورودی ثانویه و جریان خارجی را مورد بررسی قرار داد. او همچنین دریافت که با افزایش فشار خروجی شوک‌های جریان به بالادست جریان در محفظهٔ اختلاط حرکت می‌کند و باعث کاهش نسبت دبی می‌شوند. لذا همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پارامترهای هندسی و سیالاتی نقش به‌سزایی در عملکرد یک اجکتور دارند. می‌توان تصریح کرد که با بهینه‌سازی این پارامترها در یک پمپ اجکتوری می‌توان به بالاترین نسبت دبی دست یافت. نرخ دبی ایجادشده درواقع هدف اصلی طراحی و تولید پمپ اجکتوری است و تعیین‌کنندهٔ میزان کارایی این قطعهٔ به‌ظاهر سادهٔ مکانیکی نیز می‌باشد. بر این اساس در مطالعهٔ حاضر پارامترهای هندسی و فشار ورودی اولیه در پمپ اجکتوری که برای اولین‌بار در صنعت کاشت نخ مورد استفاده قرارمی‌گیرد، بهینه‌سازی شده‌اند. در صنعت کاشت نخ از پمپ‌های اجکتوری هوا برای انتقال رشته‌های نخ بااستفاده‌از سیال عامل هوا به‌سمت

سوزن‌ها برای انجام کاشت نخ استفاده شده است. در راستای بهینه‌سازی پمپ اجکتوری هوا از نرم‌افزار Fluent و براساس روش حجم محدود (Finite volume) به‌صورت ضمنی استفاده شده است. در این مطالعه پارامترهای هندسی از جمله زاویهٔ هم‌گرایی محفظهٔ اختلاط، طول محفظهٔ اختلاط با سطح مقطع ثابت در اجکتور و همچنین فشار ورودی اولیه در پمپ اجکتوری مورد بهینه‌سازی قرارگرفته است. نحوهٔ قرارگیری پمپ اجکتوری در این سیستم بافت فرش به‌گونه‌ای است که فشار خروجی دیفیوزر (P_d)، فشار اتمسفر می‌باشد و بهینه‌سازی پمپ اجکتوری در روش عددی نیز براین اساس انجام شده است.

اجزاء و عملکرد اجکتور. پمپ‌های اجکتوری شامل اجزای اصلی ازجمله ورودی اولیه، ورودی ثانویه، نازل جریان اولیه، محفظهٔ اختلاط و دیفیوزر می‌باشد. ابتدا جریان با فشار بالا از طریق ورودی اولیه وارد اجکتور می‌شود و با عبور از نازل جریان اولیه و با کاهش فشار در این ناحیه باعث مکش جریان ثانویه به داخل اجکتور می‌شود. همچنین باتوجه‌به ترکیب دو جریان در محفظهٔ اختلاط جریان ثانویه با سرعت مادون‌صوت بعد از ترکیب با جریان مافوق صوت اولیه و به‌دلیل تنش برشی به‌وجودآمده [24] بین دو جریان به سرعت صوت می‌رسد و دو جریان در این قسمت هم‌فشار می‌شوند. درادامه و در محفظهٔ اختلاط در اثر شوک‌های به‌وجودآمده سرعت سیال اولیه از مافوق‌صوت به مادون‌صوت تبدیل می‌شود و فشار دوباره افزایش می یابد. در شکل (۱) قسمت‌های مختلف اجکتور ارائه شده است.

پارامتر مهم مورد بررسی در اجکتورها، نسبت دبی (ω) است که در معادلهٔ (۱) ارائه شده است و به‌صورت نسبت نرخ جریان ثانویه عبوری به نرخ جریان اولیهٔ عبوری معرفی می‌شود [1].

$$\omega=\frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \qquad (۱)$$

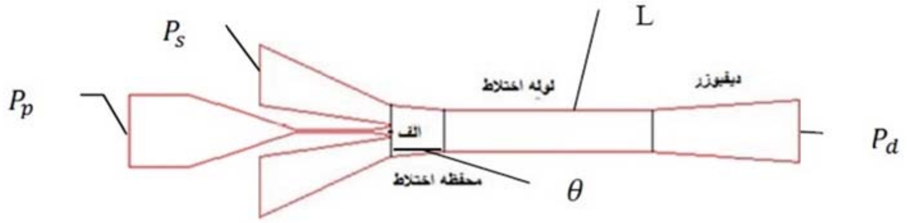
روش عددی. از روش عددی برای بررسی تأثیرات هندسی و شرایط جریان بر عملکرد پمپ اجکتوری استفاده شده است. در زیر فرضیات استفاده‌شده در روش عددی آورده شده است:

۱–دو جریان اولیه و ثانویه قبل از ورود به دیفیوزر به‌طور کامل با هم ترکیب می‌شوند.

۲– در خروجی نازل جریان اولیه، جریان ثانویه به سرعت صوت می‌رسد و فشار استاتیکی دو جریان اولیه و ثانویه در این قسمت یکسان می‌شوند.

۳– به‌دلیل باریک بودن نخ‌ها در این تحقیق از تأثیرات وجود الیاف نخ صرف‌نظر شده است.

٤– سیال عامل به‌عنوان یک سیال ایده‌آل معرفی شده است.



شکل ۱ طرح‌واره پمپ اجکتوری مورد استفاده در فرایند کاشت نخ

جریـان در پمـپ اجکتـوری از قـوانین حـاکم در معادلات دوبعدی جریان توربولانسی و تراکم‌پـذیر کـه ناویر استوکس نامیده می‌شود، پیـروی مـی‌کنـد و ایـن معادلات در نـرم‌افـزار Fluent حـل شـده‌انـد [26]. از معادلات دیفرانسـیل حجـم محـدود بـرای جداسـازی معادلات حاکم استفاده شده است. در این روش عددی معـادلات انـرژی جنبشـی و اغتشاشـی (Turbulent) بااسـتفاده‌از روش بالادسـت مرتبـه اول (First order upwind) و همچنـین معـادلات مومنتـوم، چگـالی و انرژی بـا روش بالادسـت مرتبـه دوم (Second order upwind) با روش ضمنی گسسته‌سازی شده‌اند. در هر شبیه‌سازی روش حل تا رسیدن به هم‌گرایی تکرار شد (میزان بـاقی‌مانـده در هـر شـبیه‌سـازی کمتـر از 10^{-6} انتخاب شد). در این مطالعه از روش فشـار مبنـا بـرای حل معادلات و از مدل آشفتگی Realizable $k-\varepsilon$ که نوع بهبودیافته $k-\varepsilon$ است، استفاده شده است. برخـی از پژوهشگران برروی دقت و توانایی مدل‌های مختلف آشـفتگی مطالعـه کـرده‌انـد. گاگـان و همکـاران [27] بااستفاده‌از روش سرعت‌سنجی تصویر ذرات اقـدام بـه بررسی بصری از جریان عبوری اجکتـور کردنـد. آنهـا دریافتند که مدل آشفتگی k-ε نسبت به دیگر مدل‌هـای موجود نزدیکی بیشتری به نتایج تجربی بـه‌دسـت‌آمـده دارد و همچنین از پایداری بیشـتری برخـوردار اسـت. همچنـین قربـان‌زاده و لکزیـان [28] در مطالعـۀ خـود برروی اجکتور هوای مورد اسـتفاده در سیسـتم سـلول سوختی غشا الکترولیـت پلیمـری (PEMFC)، از مـدل آشـفتگی *realizable* $k-\varepsilon$ کـه نـوع بهبودیافتـه k-ε است، استفاده نموده‌اند. در مطالعۀ حاضر برای حصـول اطمینان از مناسب بودن این مدل برای پیش‌بینی شرایط جریان و عملکـرد اجکتـور، تغییـرات نـرخ کشـندگی نسـبت بـه فشـار تخلیـه در دو مـدل آشـفتگی k-ω و Realizable k-ε محاسبه و با نتایج تجربی ارائه‌شده در مرجع [29] مقایسه و در شـکل (۲) نمـایش داده شـده است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شد، نتـایج بـه‌دسـت آمـده از مـدل توربولانسـی Realizable k-ε نزدیکی بیشتری بـه نتـایج تجربـی درمقایسـه‌بـا روش عددی مرجع [29] داشت.

معادلات حاکم

جریـان در پمـپ اجکتـوری توسـط معـادلات نـاویر استوکس متقارن محوری برای جریان تراکم‌پـذیر حـل می‌شود.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E+P)]=\vec{\nabla}.\left(\alpha_{\mathrm{eff}}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x_i}}\right)+\vec{\nabla}.[\mathrm{u_j}(\tau_{\mathrm{ij}})] \qquad (٤)$$

که خواهیم داشت:

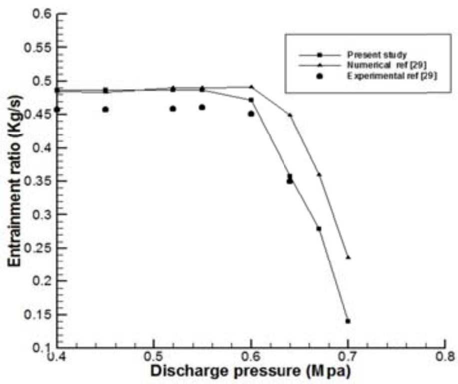
$$\tau_{ij}=\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu_{eff}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij} \qquad (۵)$$

نتایج

درادامه پس از اعتبارسـنجی روش عـددی بااسـتفاده‌از داده‌های تجربی چانگ و همکاران [29] به بهینه‌سـازی پارامترهای هندسی در پمپ اجکتـوری پرداختـه شـده است و نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

اعتبارسنجی. اعتبارسنجی نتـایج بـا داده‌هـای تجربـی چانگ و همکاران [29] انجام گرفته اسـت. شـکل (۲) مقایسه‌ای را از پارامتر نسـبت دبـی بـه‌دسـت آمـده از مطالعـه حاضـر بـا نتـایج تجربـی [29] در فشـارهـای خروجی متفاوت و در NXP=۲/۸ mm نشان می‌دهـد. همان‌طور که مشاهده مـی‌شـود نتـایج عـددی مطالعـۀ

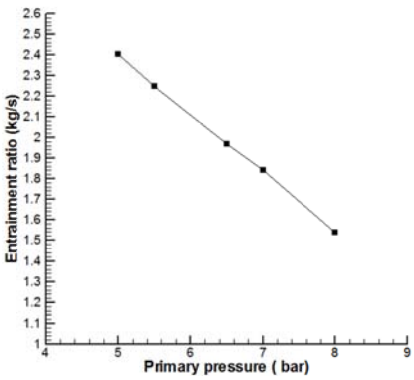
حاضر نسبت به نتایج عددی چانگ و همکاران [29] نزدیکی بیشتری به نتایج تجربی دارد. شبکه‌بندی صحیح میدان حل، داده‌های ورودی اولیه و نحوهٔ آماده‌سازی شبیه‌سازی (Initialize) و همچنین استفاده از تابع استاندارد به‌منظور تخمین شرایط جریان نزدیک دیواره و انتخاب مقدار Y^+ مناسب (در مطالعهٔ حاضر حدود ۲٤۰ است)، از جمله مواردی است که می‌تواند علت برتری نتایج عددی حاضر با نتایج عددی چانگ و همکاران [29] باشد.



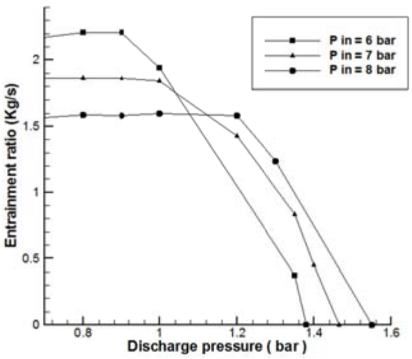
شکل ۲ مقایسهٔ نتایج عددی به‌دست آمده برای نسبت دبی از مطالعهٔ حاضر و نتایج عددی مرجع [29] با نتایج تجربی در فشارهای خروجی متفاوت

استقلال از شبکه. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، نقطه‌ای با نام (الف) انتخاب شده است تا از این طریق تغییرات فشار متناسب با تغییرات شبکه در این نقطه بررسی شود. با افزایش تعداد شبکه، تغییرات فشار در نقطهٔ عرض نقطهٔ (الف) کاهش یافته است. درنهایت با تغییر تعداد شبکه از ۲۵,٦۷۵ واحد تا ۳۲,۷۹۵ واحد تغییرات فشار در حدود % ۰/۱ بوده است که قابل چشم‌پوشی می‌باشد. درنتیجه تعداد شبکهٔ مربعی برابر با ۲۵,٦۷۵ واحد برای این مطالعه انتخاب شده است.

بهینه‌سازی فشار ورودی اولیه. بهینه‌سازی پمپ اجکتور تا حد زیادی تابعی از شرایط مرزی جریان می‌باشد. در این مطالعه مقادیر 5 bar تا 8 bar برای فشار ورودی اولیه مورد بررسی قرارگرفت. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش فشار اولیه از 5 bar تا 8 bar نسبت دبی کاهش می‌یابد، ولی براساس آنچه در شکل (٤) مشاهده می‌شود و همچنین باتوجه به اینکه فشار خروجی پمپ اجکتوری فشار اتمسفر 1 bar است، می‌توان گفت که استفاده از فشار ورودی اولیهٔ 6 bar و کمتر از این مقدار مناسب نیست، زیرا پمپ اجکتوری در این حالت و در فشار خروجی 1bar در حالت ناپایدار عملکرد خود قراردارد. همچنین در فشار اولیهٔ 7 bar مشاهده می‌شود که مرز پایداری عملکرد اجکتور در فشار خروجی 1 bar است که باتوجه به مهم بودن حاشیهٔ عملکرد مناسب برای عملکرد پایدار اجکتور، فشار اولیهٔ ورودی 7 bar نیز پیشنهاد نمی‌شود. براساس آنچه که در بالا توضیح داده شد، فشار ورودی اولیه 8 bar برای پمپ اجکتوری انتخاب شد، به‌طوری که پمپ اجکتوری در شرایط پایدار و بدون نوسانات پایداری عمل می‌کند.

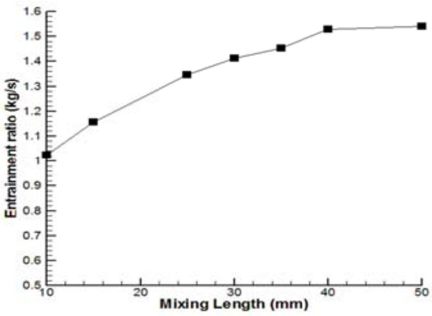


شکل ۳ تغییرات نسبت دبی با فشار ورودی اولیه



شکل ٤ تغییرات در نسبت دبی در فشارهای اولیه و خروجی متفاوت

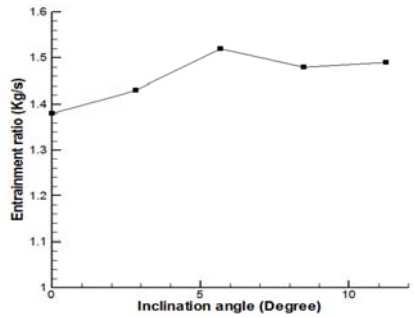
تأثیر هندسهٔ محفظهٔ اختلاط بر عملکرد پمپ اجکتوری. در این مطالعه بهینه‌سازی پمپ اجکتوری با چشم‌پوشی از ابعاد نخ در پمپ اجکتوری در فرایند کاشت نخ انجام گرفته است. همانطور که در شکل (٥) نشان داده شده است، عملکرد و بازدهی پمپ اجکتوری با تغییر طول محفظهٔ اختلاط از 10 mm تا 50 mm مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش طول محفظهٔ اختلاط تا40 mm نسبت دبی تا مقدار ۱/۵۲ =ω افزایش می‌یابد. در این شرایط نخ می‌تواند با بیشترین سرعت به سمت بیرون پمپ اجکتوری پرتاب شود. اما با افزایش بیشتر در طول محفظهٔ اختلاط تغییر محسوسی در مقدار نسبت دبی مشاهده نمی‌شود. همین‌طور که در شکل (٥) قابل مشاهده می‌باشد، با افزایش طول محفظهٔ اختلاط شدت شوک‌ها در این ناحیه کاهش یافته است و این خود دلالت بر افزایش نسبت دبی در پمپ اجکتوری دارد. در پمپ اجکتوری با طول محفظهٔ اختلاط برابر با L=10 mm, L=15 mm شدت شوک‌ها بالا است و با افزایش طول محفظهٔ اختلاط به L=40 mm شدت شوک‌ها کاهش می‌یابد و نسبت دبی تا حدود ٪۱۸/۵۱ افزایش می‌یابد. با کاهش طول محفظهٔ اختلاط شدت شوک و فشار در این ناحیه افزایش می‌یابد و این حالت موجب کاهش نسبت دبی در پمپ اجکتوری می‌شود. افزایش طول محفظهٔ اختلاط به بیشتر از L=40 mm تأثیر چندانی بر عملکرد پمپ اجکتوری ندارد و باتوجه به محدودیت‌های موجود برای اندازهٔ پمپ اجکتوری طراحی شده، مقدار بهینه برای طول محفظهٔ اختلاط 40 mm انتخاب شده است.



شکل ٥ تغییرات نسبت دبی با طول محفظهٔ اختلاط (L)

تأثیر زاویهٔ هم‌گرایی (θ) بر نسبت دبی. در قسمت اول محفظهٔ اختلاط که منطقه‌ای هم‌گرا می‌باشد، دو جریان اولیه و ثانویه با هم ترکیب می‌شوند. به‌دلیل لزجت دو سیال و تنش‌های برشی به‌وجودآمده، ترکیب دو جریان دچار شوک با زاویهٔ انبساطی بزرگ می‌شود که این پدیده مانع مکش جریان ثانویه می‌شود و نسبت دبی کاهش می‌یابد. با کاهش زاویهٔ هم‌گرایی در محفظهٔ اختلاط زمان بیشتری صرف می‌شود تا سیال ثانویه شتاب بگیرد و درنتیجه انرژی مومنتوم بیشتری بین دو سیال اولیه و ثانویه مبادله می‌شود و این موضوع باعث افزایش نسبت دبی می‌شود. با کاهش زاویهٔ هم‌گرایی به مقداری کمتر از مقدار بهینه افت اصطکاکی بیشتر می‌شود که باعث کاهش انرژی سیال و نسبت دبی می‌شود. شکل (٦) تغییرات نسبت دبی را براساس تغییر در زاویهٔ هم‌گرایی محفظهٔ اختلاط که به‌ترتیب ۰، ۲/۸، ۵/٦۷، ۸/٤ و ۱۱/۲۵ درجه می‌باشد و همچنین در فشار اولیهٔ 8 bar و در فشار خروجی (P_d) و ثانویه (P_s)، 1 bar نشان می‌دهد. در ابتدا زاویهٔ هم‌گرایی برابر $\theta = 0^0$ در نظر گرفته می‌شود که در این حالت محفظهٔ اختلاط دارای سطح مقطع ثابت می‌باشد و در این حالت کمترین نسبت دبی مشاهده شد. با افزایش زاویهٔ هم‌گرایی در محفظهٔ اختلاط از $\theta = 0^0$ به $\theta = 5.67^0$؛ نسبت دبی نیز به اندازهٔ 12.26% افزایش می‌یابد. با افزایش زاویهٔ هم‌گرایی به بیشتر از $\theta = 5.67^0$، دوباره کاهش نسبت دبی مشاهده می‌شود.

به همین دلیل مقدار بهینه برای زاویهٔ هم‌گرایی محفظهٔ اختلاط مقدار $\theta = 5.67^0$ انتخاب شد.



شکل ٦ تغییرات در نسبت دبی با تغییر در زاویه هم‌گرایی محفظهٔ اختلاط (θ)

نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین‌بار از پمپ اجکتوری برای منتقل نمودن رشته‌های نخ در فرایند بافندگی استفاده شده است. هدف اصلی در این مطالعه بهینه‌سازی هندسی در راستای افزایش نسبت دبی پمپ اجکتوری می‌باشد. از جمله پارامترهای هندسی زاویهٔ هم‌گرایی در محفظهٔ اختلاط(θ) و طول محفظهٔ اختلاط می‌باشد(L) . نتایج به‌دست‌آمده در راستای بهینه‌سازی عددی و افزایش نسبت دبی پمپ اجکتوری در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱. فشار جریان اولیه.

در این مطالعه فشار ورودی اولیه مختلف به روش عددی مورد بررسی قرار گرفت و طبق نتایج به‌دست آمده و باتوجه‌به فشار خروج $P_d = 1$ bar، فشار اولیهٔ ورودی $P_p = 8$ bar پیشنهاد شد، زیرا که در این شرایط اجکتور در شرایط پایدار عملکرد خود قرار دارد.

۲. زاویهٔ هم‌گرایی محفظهٔ اختلاط (θ).

تغییرات زاویهٔ هم‌گرایی تأثیر شاخصی بر نسبت دبی و همچنین قدرت مکش نخ به داخل پمپ اجکتوری دارد. مقدار این زاویه از ۰ تا ۱۱/۲۵درجه تغییر کرده است و مقدار بهینه که در آن نسبت دبی ماکزیمم است، θ=5/67° می‌باشد.

۳. طول محفظهٔ اختلاط.

مقدار طول محفظهٔ اختلاط از 10 mm تا40 mm تغییر داده شد. با افزایش این پارامتر تا مقدار 40 mm نسبت دبی نیز افزایش می‌یابد و نخ با مومنتوم بیشتری به‌سمت سوزن‌ها در فرایند کاشت نخ حرکت می‌کند. افزایش بیشتر تأثیر چندانی بر عملکرد پمپ اجکتوری ندارد.

فهرست علائم

$\dot{m}_P$	نرخ عبوری جریان اولیه
$\dot{m}_s$	نرخ عبوری جریان ثانویه
P_d	فشار خروجی
P_p	فشار ورودی اولیه
P_s	فشار ورودی ثانویه
L	طول محفظهٔ اختلاط
θ	زاویهٔ هم‌گرایی محفظهٔ اختلاط
NXP	موقعیت خروجی نازل جریان اولیه
ω	نسبت دبی
ρ	چگالی
d_d	قطر خروجی دیفیوزر
u	سرعت
k	شاخص ایزنتروپیک
P_k	انرژی جنبشی توربولانسی
τ	تنش برشی
μ	لزجت
α	ضریب نفوذ حرارتی

مراجع

1. Chen, W., Chong, D., Yan, J. and Liu, J., "Numerical optimization on geometrical factors of natural gas ejectors", International Journal of Thermal Sciences, 50(8),pp. 1554-1561, (2011).
2. McGovern, R.K., Bulusu, K.V., Antar, M.A. and Lienhard, J.H., "One-dimensional Model of Optimal Ejector and Parametric Study of Ejector Efficiency", 2012 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization and Simulation of Energy Conversion Systems and Processes (ECOS 2012) (June 2012).
3. Al-Doori, Ghassan.F.L., "Investigation of Refrigeration System Steam Ejector Performance Through Experiments and Computational Simulations", Doctoral dissertation, University of Southern Queensland, (2013).
4. Rao, S.M. and Jagadeesh, G., "Novel supersonic nozzles for mixing enhancement in supersonic ejectors", Journal of thermal engineering, *71*(1), pp. 62-71, (2014).
5. Selvaraju, A. and Mani, A.,"Experimental investigation on R134a vapour ejector refrigeration system", *International Journal of Refrigeration*, *29*(7), pp. 1160–1161, (2006).
6. Guo, J. and Shen, H.G., "Modeling solar-driven ejector refrigeration system offering air conditioning for office buildings", *Energy and Buildings , 41(2)*, pp. 175–181, (2009).
7. Nalim, M.R., Izzy, Z. A. and Akbari, P., "Rotary wave-ejector enhanced pulse detonation engine", *Journal of Shock Waves*, *22*(1), pp. 23-38, (2012).
8. Xu, Y., Sun, Z., Meng, Z. and Sun, Y., "Research on Mechanism Analysis and Elimination Method for the Tufted Carpet Stop Mark", *Fibres & Textiles in Eastern Europe, 105*(3), pp. 66-72, (2014).
9. Zou, J.J., Zhou, J., Lu, H.Q. and Hu, Y., "Experimental investigation on starting process of supersonic single-stage air ejector", Journal of thermal science, *21*(4), pp. 348-353, (2012).
10. Lakzian, E. and Masjedi, A., "Slip effects on the exergy loss due to irreversible heat transfer in a condensing flow", *International Journal of Exergy*, *14*(1), pp. 22-37, (2014).
11. Lakzian, E. and Shabani, A., "Analytical investigation of coalescence effects on the exergy loss in a spontaneously condensing wet-steam flow", *International Journal of Exergy*, *16*(4), pp. 383-403, (2015).
12. Mahpeykar, M.R., Lakzian, E. and Amiri, E., "Reduction of Thermodynamic Losses in supersonic nucleating steam nozzle by spraying water droplets", *Scientia Iranica*, *16(3),* pp. 253-262, (2009).
13. Rezazadeh, J., Lakzian, E. and Mahpeykar, M.R., "Effect of the droplet surface tension correction on nucleation condensing water vapor flow", *Modares Mechanical Engineering*, *16(2),* pp. 264- 274, (2016), (In Persian).
14. Lakzian, E., Rezaeimoghaddam, M. and Zarenejad, S., "Investigation of 2D Invisid Condensation Flow in Convergent Divergent Nozzle with Heating Source Term in Convergent Section", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 12, pp. 9-21, (2016), (In Persian).
15. Lakzian, E., Shabani, S., Masjedi, A. and Salmani, F., "Analytical Model for Slip Effects Between Vapor and Liquid Phases in a Supersonic Condensing Flow Through a Convergent - Divergent Nozzle", *Tabriz Mechanical Engineering*, *44(1),* pp. 17-28, (2014), (In Persian).
16. Teymourtash, A.R., Mahpeykar, M.R. and Lakzian, E., "Simulation of phenomenon of spontaneous phase change of water vapor with suitable nucleation and droplet growth equation for low condensation pressure", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 3. pp. 89-102, (2014), (In Persian).
17. Lakzian, E. and Shabani, S., "Investigation of the Effects of Droplet Coalescence on the Wet Steam Flows", *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 1(1), pp. 51-62, (2014), (In Persian).

18. Teymourtash, A.R., Mahpeykar, M.R. and Lakzian, E., "Controlling the Intensity and Location of Spontaneous Condensation in a 2-D Laval Nozzle by Spraying Water Droplets at the Throat", *Aerospace Mechanics Journal*, *7*(4), pp. 35-49, (2011), (In Persian).
19. Teymourtash, A.R., Mahpeykar, M.R. and Lakzian, E., "An Investigation of Condensing Steam Flow in a Turbine Cascade with Injection of Water Droplets at Inlet", *Amir Kabir Mechanics Journal*, Vol. 43, pp. 71-83, (2011), (In Persian).
20. Mahpeykar, M.R., Teymourtash, A.R. and Lakzian, E., "An Investigation of viscous effects in Condensing Steam Flow in a Turbine Cascade", *ISME Journal*, Vol. 11, pp. 7-27, (2009), (In Persian).
21. Teymourtash, A.R., Mahpeykar, M.R. and Lakzian, E., "An Investigation of Condensing Steam Flow in a Turbine Cascade Using the Baldwin- Lomax Model", *Sharif Mechanics Journal*, Vol. 27, pp. 25-36, (2009), (In Persian).
22. Zhu, Y., Cai, W., Wen, C. and Li, Y., "Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors", Journal of Thermal Engineering, 29(5-6), pp. 898–905, (2009).
23. Ji, M., Utomo, T., Woo, J., Lee, Y., Jeong, H. and Chung, H., "CFD investigation on flow structure inside thermo vapor compressor", Energy, 35(6), pp. 2694–2702, (2010).
24. Sriveerakul, T., Aphornratana, S. and Chunnanond, K., "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics, Part 2. Flow structure of steam ejector influenced by operating pressures and geometries", *International Journal of Thermal Sciences*, 46(8), pp. 823–833, (2007).
25. Liu, Y., Xin, T., Cao, L., Wan, C. and Zhang, M., "Compression injection hybrid refrigeration cycles in house hold refrigerators", *Journal of Appl. Thermal Engineering*, *30*(16), pp.2442-2447, (2010).
26. Rusly,E., Aye, L., Charters , W.W.S. and Ooi. A., "CFD analysis of ejector in combined Ejector cooling system", *International Journal of Refrigeration, 28(7),* pp. 1092–1101, (2005).
27. Gagan, J., Smierciew, K., Butrymowicz, D. and Karwack, J., "Comparative study of turbulence models in application to gas ejectors", *International journal of Thermal Sciences*, Vol. 78, pp. 9-15, (2014).
28. Ghorbanzadeh, S. and Lakzian, E., "A numerical comparison between ejector performance with convergence and convergence-divergence primary nozzle", Modares Mechanical Engineering, 16(1), pp. 324-332, (2016), (In Persian).
29. Chong, D., Hu, M., Chen, W., Wang, J., Liu, J. and Yan, J., "Experimental and numerical analysis of supersonic air ejector", Applied Energy, 130, pp. 679-684, (2014).